



УДК 697.34

**КОГЕНЕРАЦИЯ НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ
ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ****COGENERATION BASED ON COAL
GASIFICATION**

Довгалиук Илья Владимирович, бакалавр каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ilia.dovg@gmail.com, Тел.: +7(982)637-90-12

Осминкина Анастасия Сергеевна, бакалавр каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: anestezia97@mail.ru. Тел.: +7(343) 375-45-67

Тупоногов Владимир Геннадьевич, д.т.н., профессора каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.g.tuponogov@urfu.ru, Тел.: +7(343)375-45-67

Дубинин Алексей Михайлович, д.т.н., профессора каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. , Тел.: +7(343)375-45-67

Ilya V. Dovgaluk, Bachelor student, Department «Heat power engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street,19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ilia.dovg@gmail.com Ph.: +7(982)637-90-12

Anastasia S. Osminkina, Bachelor student, Department «Heat power engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street,19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: anestezia97@mail.ru. Ph.: +7(343) 375-45-67

Vladimir G. Tuponogov, Doctor of Technical Sciences, professor of department «Heat power engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street,19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.g.tuponogov@urfu.ru, Ph.: +7(343)375-45-67

Alexey M. Dubinin, Doctor of Technical Sciences, professor of department «Heat power engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street,19, Ekaterinburg, Russia. Ph.: +7(343)375-45-67

Аннотация: Синтез-газ для электрохимического генератора производится в газогенераторе паровой газификацией полукокса бородинского угля. В работы рассчитаны: электрический коэффициент полезного действия (брутто), температура в аноде, потери с уходящими газами и в окружающую среду через тепловую изоляцию, электродвижущая сила топливного элемента, удельные расходы условного топлива на выработку электрической энергии и теплоты.

Ключевые слова: газогенератор; электрохимический генератор; уголь; водяной пар; коэффициент полезного действия; тепловой баланс.

Abstract: Fuel cell synthesis gas is produced in gas generator of steam Borodinskiy charcoal gasification. Gross efficiency, anode temperature, loses with outgoing gases and to the environment through thermal isolation, electromotive force of fuel cell, fuel consumption on heat-and-power production are calculated in this study.

Keywords: gasifier; fuel cell; coal; steam; efficiency; heat balance.

Прямое преобразование энергии химических реакций окисления органических топлив в электричество, реализуют в топливном элементе, состоящем из двух электродов - анода, катода и электролита между ними. Наиболее удобными являются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), т.к. в них в качестве топлива используется синтез-газ.

Однако, запасы органических видов топлива, хранящиеся в литосфере Земли на 90%, состоят из каменного угля. Поэтому разрабатываются способы производства синтез-газа из угля, в том числе в псевдоожиженном слое, в котором идеально перемешивается твёрдая фаза и плохого-газовая, а температура распределяется равномерно по всему объёму слоя. Объединение технологии газификации угля и ТОТЭ позволяет производить электроэнергию с КПД более 60%, улавливать более 90% диоксида углерода и является перспективным решением для развития угольных электростанций в будущем. Так, выбросы загрязняющих веществ будут значительно сокращены в когенерационной установке на основе газогенератора и топливного элемента, обеспечивая гораздо меньшие выбросы NO , CO , SO_x и твердых частиц, которые типичны для обычных установок на ТОТЭ.

Для анализа эффективности работы элементов схемы необходимо определить температуру в реакционном объеме газогенератора и его химический КПД, долю водорода, окисленного в аноде ТОТЭ, КПД планарного твердооксидного топливного элемента, КПД электрохимического генератора и сравнить их с аналогичными опубликованными исследованиями.

Для паровой газификации использовался полукокс бородинского бурого угля. Расход углерода полукокса в газогенератор 2,52 кг/ч, перегретого до 350 °С водяного пара 5,3 кг/ч. Массовый расход синтез-газа, необходимого для производства 12 кВт электрической мощности ЭХГ: $V_{\text{ст}} = 2,64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$. Мощность, потребляемая газогенератором составила 13,46 кВт. КПД по выработке электрической энергии энергетической установки $\eta^* = 0,4$ (40%).

В электрохимических генераторах (ЭХГ) используются батареи топливных элементов планарной конструкции с проточным течением синтез-газа и воздуха в анодном и катодном каналах. Объединение технологии газификации угля и твердооксидных топливных элементов позволяет производить электричество с эффективностью 60%, улавливать более чем 90% CO_2 [1]. Схема представлена на Рисунке 1.

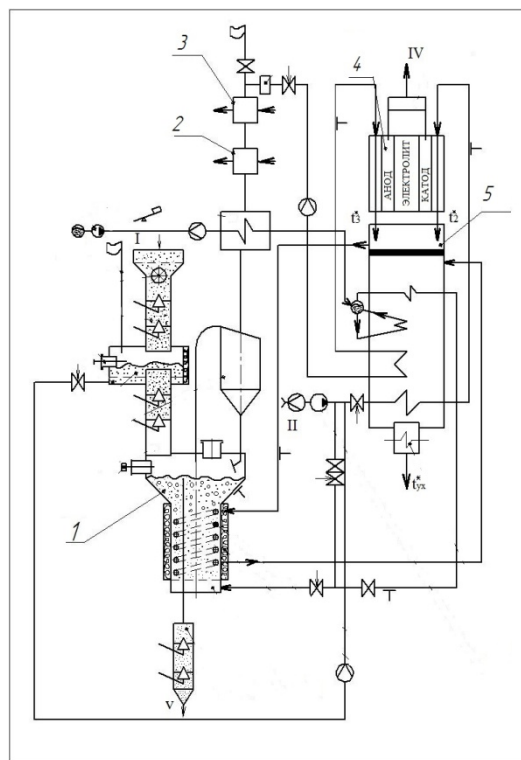


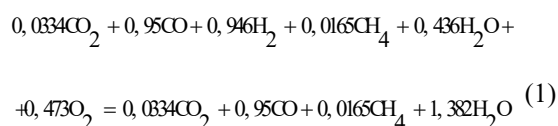
Рис. 1 Схема установки электрохимического генератора, работающего на продуктах паровой газификации угля.

1 - газогенератор с псевдоожиженным слоем полукокса; 2 - аппарат для удаления диоксида серы из синтез-газа; 3 - аппарат для удаления сероводорода из синтез-газа; 4 - батарея ТОТЭ; 5 - котел-утилизатор.

Основой для производства синтез-газа является газогенератор (1) с псевдоожиженным слоем мелкодисперсного полукокса. Уголь размалывается дробилкой до 3-5 мм, далее поступает в шлюзовой питатель, а из него в печь с псевдоожиженным слоем слабо окислительного пиролиза для удаления из угля смолы, уксусной кислоты, скипидара и фенолов. Образовавшийся полукокс через шлюзовой затвор поступает в газогенератор. Под парораспределительную решетку подается перегретый в котле-утилизаторе водяной пар. Для розжига у газогенератора предусмотрен подвод воздуха вместо водяного пара. Тепловая мощность для осуществления эндотермической реакции, подогрев продуктов этой реакции и тепловые потери подводится через трубчатый теплообменник, в который подводятся продукты из анодного и катодного каналов. Продукты газификации отводятся через циклон-пылеуловитель. Далее синтез-газ охлаждается в экономайзере, очищается в аппарате от остатков диоксида серы, а оставшийся сероводород удаляется в аппарате (3) известными сухими технологиями. Далее доочищенный синтез-газ в цеолите NaA поступает в котел-утилизатор (5) для

нагрева до 750 °С и далее в анодный канал. Воздух для катодного канала от газодувки поступает для нагрева в К.У. и далее в катодный канал.

Согласно [2] доля в ЭДС от реакции окисления СО в аноде ТОТЭ составляет менее 1% от доли окисления водорода и в расчетах ею пренебрегают. В аноде ТОТЭ окисляется только водород. В аноде ТОТЭ окисление водорода из синтез-газа кислородом, поступающим из электролита, протекает по стехиометрическому уравнению:



Расчёт уровня температуры в аноде 780 °С при окислении водорода кислородом воздуха и ЭДС одного топливного элемента 0,985 В находятся в интервалах значений, приведённых в [3]. Электрический КПД топливного элемента 35,4%, а доля расходуемого в аноде водорода 73% соответствует данным [4]. Низкая концентрация водорода в синтез-газе 28% ограничивает скорость диффузии водорода в анод, поскольку она зависит от разности концентраций водорода в синтез-газе и материале анода. Поэтому 27% водорода не успевает окислиться и проходит в котёл-утилизатор, где окисляется, что приводит к высокой температуре уходящих газов 647 °С и большой относительной потере теплоты с уходящими газами - 26%. Расходы условного топлива 0,183 кг на 1 кВт·ч электрической энергии и 51 кг на 1 ГДж тепловой энергии согласуются с данными [5] - 0,17 и 48 соответственно.

Определен электрический КПД (брутто) батареи ТОТЭ: $\eta = 0,354$ (35,4%). Величина КПД находится в соответствии с [4,6]. Величина доли окисленного водорода в аноде 0,73 согласуется с опубликованными данными [6].

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии составил $b_e = 0,183 \text{ кг у.т.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии, отпускаемой в тепловые сети: $b_m = 51 \text{ кг у.т.}/\text{ГДж}$ (213 кг у.т./Гкал).

Выполнена расчетная попытка применения газогенератора с псевдоожиженным слоем, для производства синтез-газа паровой газификацией полукокса бородинского угля, используемого для работы электрохимического генератора на базе ТОТЭ.

Исследования показали: температура продуктов окисления водорода на выходе из анода ТОТЭ 780°С, электрический КПД (брутто) $\eta = 35,4 \%$, доля водорода, окисленного в аноде, $\varphi_m = 0,73$ (73%), ЭДС топливного элемента $E_e = 0,985 \text{ В}$, удельная тепловая потеря с уходящими газами $q_2 = 26 \%$, в окружающую среду $q_5 = 38,6\%$, электрическая мощность ЭХГ 12,49 кВт. Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии в $b_e = 0,183 \text{ кг у.т.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, тепловой энергии $b_m = 51 \text{ кг у.т.}/\text{ГДж}$. Удельные показатели согласуются с другими публикациями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Li M., Rao A.D., Brouwer J., Samuelsen G.S. Integrated Gasification combined cycle // J. of power resources. 2010. V. 195. № 17. P. 5707-5718
2. Коровин Н. А. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2005.
3. Мунц В. А., Волкова Ю. В., Плотноков Н. С. Исследование характеристик энергетической установки 5 кВт на твердооксидных топливных элементах с паровым риформингом природного газа // Теплоэнергетика. 2015. №11. с. 15-20
4. Baskakov A. P., Volkova Y. V., Plotnikov N. S. Optimum Chemical Regeneration of the Gases Burnt in Solid Oxide Fuel Cells // J. of Engineering Physics Thermophysics. 2014. V. 87. № 4. P. 763-778.
5. Дубинин А.М., Кагарманов Г.Р., Обожин О.А. Угольная мини-ТЭЦ на двухзонном газогенераторе с кипящим слоем // Теплоэнергетика. 2012. №2. с. 68-70.
6. Baskakov A. P., Volkova Y. V., Plotnikov N. S. Optimum chemical regeneration of the gases burnt in solid oxide fuel cells // J. of Engineering Physics Thermophysics. 2014. V. 87. № 4. P. 763-778.